

推进炼油与汽车行业协同发展战略研究

曹湘洪

(中国石油化工集团有限公司, 北京 100127)

摘要: 电动车、燃料电池车等新能源汽车快速发展开启了汽车动力革命的大幕。内燃机汽车制造行业和油品生产行业通过满足最新排放限值要求、提升油品质量、推进内燃机技术不断进步等积极应对汽车动力革命。新能源汽车优势与劣势并存, 短期内不具备全面替代内燃机汽车的条件。采用高效内燃机的油电混合动力汽车可大幅度降低污染物排放和碳排放, 是符合我国国情的动力汽车。面向 2050 年, 内燃机汽车、油电混合动力汽车、燃料电池车、纯电动车等将发挥各自的技术优势, 多元共存, 但内燃机动力车会占据主体地位, 汽车动力对液体燃料的依赖度还将超过 60%。炼油、汽车行业要推进协同发展, 从分子层面研究内燃机中燃料的燃烧机理, 研究车用燃料组成、馏程与颗粒物排放的关系并开发简化模型、开发并推广高品质燃料及高档润滑油, 以适应汽车动力多元化时代新的低碳减排要求。

关键词: 汽车动力革命; 内燃机技术; 油品质量; 协同发展

中图分类号: U461 **文献标识码:** A

Strategic Research on Promoting Coordinated Development of Refining and Automobile Industries

Cao Xianghong

(China Sinopec Group, Beijing 100127, China)

Abstract: The rapid development of new energy vehicles such as electric vehicles and fuel cell vehicles has initiate the age of automobile power revolution. The internal combustion engine vehicle (ICEV) manufacturing industry and the fuel production industry actively respond to the automobile power revolution by satisfying the latest requirement for emissions, upgrading the quality of oil products, and advancing the development of internal combustion engine technology. Although new energy vehicles have some advantages, they can not comprehensively replace the ICEVs in a short term. Gasoline electric hybrid vehicles with high-efficiency internal combustion engines will significantly reduce pollutant and carbon emissions, which are in line with China's national conditions. By 2050, ICEVs, gasoline electric hybrid vehicles, fuel cell vehicles, and pure electric vehicles will coexist based on their respective technological advantages. However, the ICEVs will still predominate in the automobile market by then, and the dependence of automobile power on liquid fuels will exceed 60%. Therefore, the petroleum refining and automobile manufacturing industries should develop coordinately by studying the combustion mechanism from a molecular perspective in the internal combustion engines; exploring the relationship between fuel composition, distillation range, and particulate matter emissions, and developing simplified

收稿日期: 2019-05-06; 修回日期: 2019-05-09

通讯作者: 曹湘洪, 中国石油化工集团有限公司科技委资深委员, 中国工程院院士, 美国工程院外籍院士, 主要研究方向为石油化工;

E-mail: weizhq@sinopec.com

本刊网址: www.engineering.org.cn/ch/journal/sscae

models; developing and promoting high-quality fuels and high-grade lubricants to adapt to the low-carbon and emission reduction requirements in the era of automotive power diversification.

Keywords: automobile power revolution; internal combustion engine technology; oil quality; coordinated development

一、新能源汽车开启了汽车动力革命的大幕

(一) 电动车“井喷式”发展

近年来，为降低 CO₂ 排放和改善空气质量，世界上一些国家出台政策推动电动车快速发展，少数国家通过提出禁售内燃机汽车时间表倒逼新能源汽车发展，荷兰、挪威计划禁售时间为 2025 年，法国计划禁售时间为 2040 年，2018 年我国海南省宣布 2030 年禁售燃油车。为了推动电动车的发展，我国实施高额财政补贴政策，个别城市还采用有别于内燃机汽车的购买和行驶政策，2018 年财政补贴退坡，又增加了“双积分”政策。

据国际能源署统计 [1]，2017 年世界电动车保有量比 2013 年增加约 1.5 倍，接近 311 万辆，销售量增加约 5.7 倍，接近 115 万辆；我国电动车保有量比 2013 年增加约 38 倍，达到 122.6 万辆，销售量增加约 38 倍，达到 57.9 万辆，居世界电动车保有量和销售量第 1 位。图 1、图 2 分别给出了 2013—2017 年中国及世界电动车，包括纯电动车和插电式混合动力车的保有量、销售量趋势图，我国电动车呈“井喷式”发展趋势。

(二) 燃料电池车加入汽车动力革命

氢燃料电池车是未来汽车低碳化发展的重要方向，正在步入市场导入阶段并开始加入汽车动力革命。从 20 世纪 80 年代起，欧盟、美国、日本、韩国等已投入大量资金和人力研究氢燃料电池车，加拿大巴拉德公司，德国戴姆勒梅赛德斯奔驰汽车公司、宝马集团，日本本田株式会社、丰田汽车公司，美国通用汽车公司，韩国现代集团等汽车公司研发的燃料电池车先后上路试运行。韩国现代集团、日本丰田汽车公司、本田株式会社分别在 2013 年、2014 年、2016 年推出燃料电池乘用车并向市场发售。

我国中国科学院大连化学物理研究所、同济大学、清华大学、上海汽车集团股份有限公司、北京福田汽车股份有限公司等科研院所、高校及汽车企业基本和世界同步开展了燃料电池车研究。提出到 2030 年，全国燃料电池车产销量达到 100 万辆、建设 1000 座加氢站。上海、北京、武汉、佛山、盐城、如皋等地相继开展燃料电池公交车、物流车的运行示范，多地正在建设氢能产业园。2013—2017 年，全球总计售出 8451 辆氢燃料电池车 [2]，其中中国售出 1901 辆，占比约为 22.5%。国外氢燃料电池

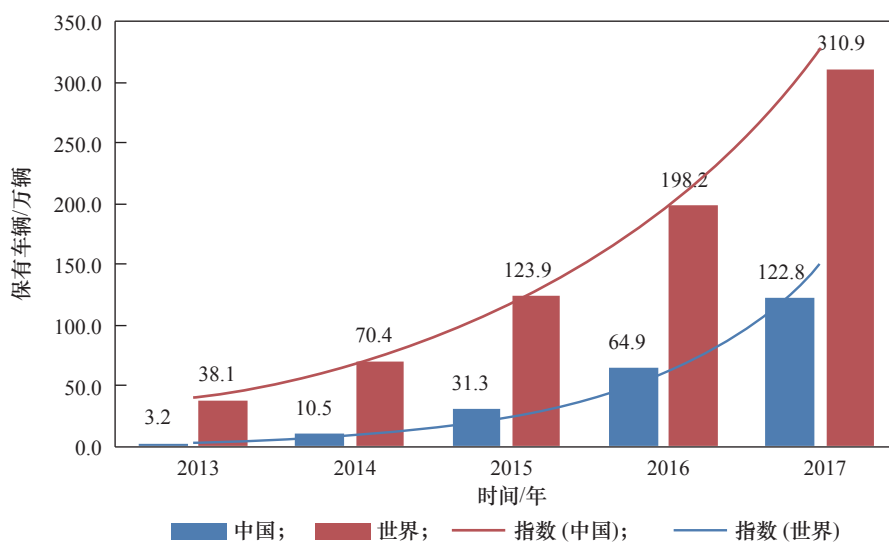


图 1 中国及世界电动车保有量趋势图 (2013—2017 年)

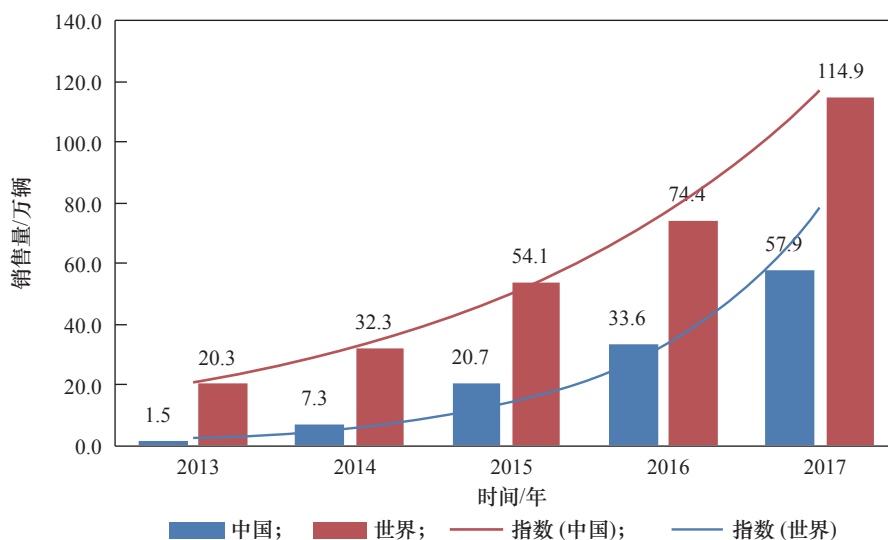


图2 中国及世界电动车销售量趋势图 (2013—2017年)

车以乘用车、大巴车为主，国内以物流车和大巴车为主。

二、内燃机汽车制造商与车用燃料供应商积极应对汽车动力革命

(一) 最严内燃机汽车排放限值标准颁布实施

2016年12月，我国公布了目前世界上最严格的《轻型汽车污染物排放限值及测量方法（中国第六阶段）》自2020年7月1日起实施，国务院发布文件要求从2019年7月开始在重点区域、珠江三

角洲和成渝地区执行国6a标准。汽车制造商积极研发满足国6限值的内燃机，已有65家企业公布了1216个车型可达到国6b排放限值。

表1和表2列出了国1~国6和欧I~欧VI汽油车和柴油车的污染物排放限值，中国内燃机汽车排放限值处于世界最严序列。

(二) 车用油品质量已跨入世界先进序列

车用汽油、柴油质量升级是降低内燃机汽车污染物排放的重要措施。我国用19年时间，完成从生产含铅汽油到执行国6a标准的质量升级

表1 国1~国6和对应的欧I~欧VI汽油车污染物排放限值

| 标准 | 执行时间 | 限值指标/($\text{mg}\cdot\text{km}^{-1}$) | | | | | | |
|--------|---------|-----------------------------------------|------|-------|-----------------|------------------|--------|-------------------|
| | | CO | THC | NMHC | NO _x | N ₂ O | PM | P[#/km] |
| 欧 I | 1992年7月 | 2.72 | — | *0.97 | — | — | — | — |
| 国 1 | 2000年7月 | 2.72 | — | *0.97 | — | — | — | — |
| 欧 II | 1996年1月 | 2.2 | — | *0.5 | — | — | — | — |
| 国 2 | 2005年7月 | 2.2 | — | *0.5 | — | — | — | — |
| 欧 III | 2000年1月 | 2.3 | 0.2 | — | 0.15 | — | — | — |
| 国 3 | 2008年7月 | 2.3 | 0.2 | — | 0.15 | — | — | — |
| 欧 IV | 2005年1月 | 1.0 | 0.1 | — | 0.08 | — | — | — |
| 国 4 | 2011年7月 | 1.0 | 0.1 | — | 0.08 | — | — | — |
| 欧 V | 2009年9月 | 1.0 | 0.1 | 0.068 | 0.060 | — | 0.0045 | — |
| 国 5 | 2017年1月 | 1.0 | 0.1 | 0.068 | 0.060 | — | 0.0045 | — |
| 欧 VIb | 2014年9月 | 1.0 | 0.1 | 0.068 | 0.060 | — | 0.0045 | 6×10^{11} |
| 国 6a | 2020年7月 | 0.7 | 0.1 | 0.068 | 0.060 | 0.020 | 0.0045 | 6×10^{11} |
| 欧 VIId | 2017年9月 | 1.0 | 0.1 | 0.068 | 0.060 | — | 0.0045 | 6×10^{11} |
| 国 6b | 2023年7月 | 0.5 | 0.05 | 0.035 | 0.035 | 0.020 | 0.0030 | 6×10^{11} |

注：*为HC+NO_x限值；THC：Total HC 总碳氢；NMHC：Non Methane HC 非甲烷碳氢；P[#/km]：颗粒物数量

之路。2016年发布了第6阶段车用汽、柴油标准(GB17930—2016和GB19147—2016),其中汽油标准分为6a和6b两个阶段,要求2019年1月1日全国执行6a标准,2023年1月1日全国执行6b标准。我国第6阶段车用汽、柴油的主要指标已经达到了欧洲现阶段车用汽、柴油标准水平,部分指标优于现行的欧盟、美国和日本标准,详见表3、表4。

(三) 内燃机技术已经并将继续进步

提高发动机热效率是内燃机汽车降低油耗实现低污染排放的主要措施。在世界范围内先进燃烧、高增压和小型强化、多变量多系统内燃机智能控制、余热回收、智能停缸、工质移缸、缸内喷水等技术的开发不断取得进展,有的已经成功应用。热效率

为41%的汽油机已量产,在实验室汽油机峰值热效率已达到51%以上,柴油机的峰值热效率达到55%以上[3~5];在我国应用自主开发的多脉冲燃油喷射高混合率技术,热效率达到45.5%,排放满足国6b限值的柴油机已在企业应用;潍柴集团在2018年汽车强国论坛上宣布,热效率超过50%的柴油车在2020年量产并推向市场,国际内燃机界把有效热效率达到60%作为奋斗目标。

油电混合动力汽车(HEV)是未来内燃机汽车转型发展的重要方向。HEV以汽油或柴油为燃料,在不同工况下分别或共同使用内燃机和电动机驱动,使内燃机始终在最高效率区运行,还能回收减速和制动时的能量,降低油耗和有害物排放可在30%以上[6]。图3是根据丰田汽车HEV达到的排

表2 国1~国6和对应的欧I~欧VI柴油车污染物排放限值

| 标准 | 执行时间 | 限值指标/(mg·km ⁻¹) | | | | | | |
|------|---------|-----------------------------|------|-------|-----------------|--------------------|-----------|--------------------|
| | | CO | THC | NMHC | NO _x | HC+NO _x | PM | P[#/km] |
| 欧I | 1992年7月 | 2.72 | — | — | — | 0.97 | 0.14 | — |
| 国1 | 2000年7月 | 2.72 | — | — | — | 0.97/1.36 | 0.14/0.20 | — |
| 欧II | 1996年1月 | 1.0 | — | — | — | 0.7/0.9 | 0.08/0.10 | — |
| 国2 | 2005年7月 | 1.0 | — | — | — | 0.7/0.9 | 0.08/0.10 | — |
| 欧III | 2000年1月 | 0.64 | — | — | 0.50 | 0.56 | 0.05 | — |
| 国3 | 2008年7月 | 0.64 | — | — | 0.50 | 0.56 | 0.05 | — |
| 欧IV | 2005年1月 | 0.50 | — | — | 0.25 | 0.30 | 0.025 | — |
| 国4 | 2011年7月 | 0.50 | — | — | 0.25 | 0.30 | 0.025 | — |
| 欧V | 2009年1月 | 0.50 | — | — | 0.18 | 0.23 | 0.005 | 6×10 ¹¹ |
| 国5 | 2017年1月 | 0.50 | — | — | 0.18 | 0.23 | 0.005 | 6×10 ¹¹ |
| 欧VIb | 2014年9月 | 0.50 | — | — | 0.080 | 0.17 | 0.0045 | 6×10 ¹¹ |
| *国6a | 2020年7月 | 0.70 | 0.1 | 0.068 | 0.060 | **0.020 | 0.0045 | 6×10 ¹¹ |
| *国6b | 2023年7月 | 0.5 | 0.05 | 0.035 | 0.035 | **0.020 | 0.0030 | 6×10 ¹¹ |

注: *为国6阶段的污染物排放,采用燃料中立原则,汽油车与柴油车执行同样限值;**为N₂O限值

表3 我国第六阶段车用汽油标准主要技术指标与欧盟、美国、日本现行指标的比较

| 主要参数 | | 国6a/6b | 欧盟VI | 美国 | 日本 |
|----------------------------|-----|----------|-------------|----------|-------|
| RON | 不小于 | 89/92/95 | 95 | — | 89/96 |
| MON | 不小于 | — | 85 | — | — |
| AKI | 不小于 | 84/87/90 | — | 87/89/91 | — |
| 硫含量/(mg·kg ⁻¹) | 不大于 | 10 | 10 | 10 | 10 |
| 苯含量/% | 不大于 | 0.8 | 1.0 | — | 1.0 |
| 烯烃含量/% | 不大于 | 18/15 | 18 | — | — |
| 芳烃含量/% | 不大于 | 35 | 35 | — | — |
| T50/°C | 不高于 | 110 | 46~71(E100) | 71~121 | 110 |
| T90/°C | 不高于 | 190 | ≥75(E150) | 190 | 180 |
| 终馏点/°C | 不高于 | 205 | 210 | 225 | 220 |

注: RON: 研究法辛烷值; MON: 马达法辛烷值; AKI: 抗爆指数

表 4 我国第 6 阶段车用柴油标准主要技术指标与欧盟、美国、日本现行指标的比较

| 主要参数 | | 国 6 | 欧盟 VI | 美国 | 日本 |
|---------------------------------------------|-----|-----------------|------------|---------|-------------|
| 十六烷值 | 不小于 | 51/49/47 | 51/49/47 | 40 | 50/45 |
| 十六烷指数 | 不小于 | 46/43 | 46/43 | 40 | 50/45 |
| 硫含量 / ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) | 不大于 | 10 | 10 | 15 | 10 |
| 多环芳烃 (PAH) 含量 / % | 不大于 | 7 | 8 | — | — |
| 润滑性 / μm | 不大于 | 460 | 460 | 520 | — |
| 闪点 / $^{\circ}\text{C}$ | 不低于 | 60/50/45 | 55 | 52 | 50/45 |
| T50/ $^{\circ}\text{C}$ | 不高于 | 300 | < 65(E250) | — | — |
| T90/ $^{\circ}\text{C}$ | 不高于 | 355 | > 85(E350) | 282~338 | 360/350/330 |
| T95/ $^{\circ}\text{C}$ | 不高于 | 360 | 360 | — | — |
| 总污染物含量 / ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) | 不高于 | 24 | 24 | — | — |
| 密度 / ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$) | | 810~845/790~840 | 820~845 | — | 不大于 860 |

限值绘制的与欧 V 和国 6b 排放限值的比较图, 由图 3 可见 HEV 主要污染物排放远低于国 6b 和欧 V 排放限值。HEV 车不改变消费者使用习惯, 不涉及充电问题, 可充分利用已有炼油能力和基础设施, 不增加社会投资和凝结在社会投资中的碳排放, 是在汽车动力革命过程中最容易达到污染物和碳减排效果且符合中国国情的选择。

三、我国汽车动力多元化进程中的油品消费趋势

(一) 新能源汽车优势劣势并存, 全面替代内燃机汽车尚需时日

电动车的首要优势是在使用过程中无碳排放和无污染排放, 但在全寿命周期内, 电动车 CO_2 排放量与所在国家发电能源结构密切相关 [7], 化石能源发电占比超过 50% 的国家, 纯电动车与内燃机车相比 CO_2 排放量不具备明显优势; 化石能源发电占比超过 80% 的国家, 纯电动车 CO_2 排放量高于内燃机车。日本东京大学的研究认为, 按日本的电力结构纯电动车全寿命周期的 NO_x 、PM、 SO_x 等污染物排放高于汽油车。电动车由于整备质量高于同载重质量内燃机汽车约 30%, 在其行驶过程中的车轮及道路摩擦产生的 PM 排放会高于内燃机汽车, 总的 PM_{10} 、 $\text{PM}_{2.5}$ 排放并不比内燃机汽车低 [8]。按我国超超临界发电的煤耗指标计算, 电动轿车行驶过程中的百公里 CO_2 排放和百公里油耗与 7.15 L 的汽油轿车相当, 目前先进内燃机及 HEV 轿车的百公里油耗已显著低于 7.15 L (见图 4)。

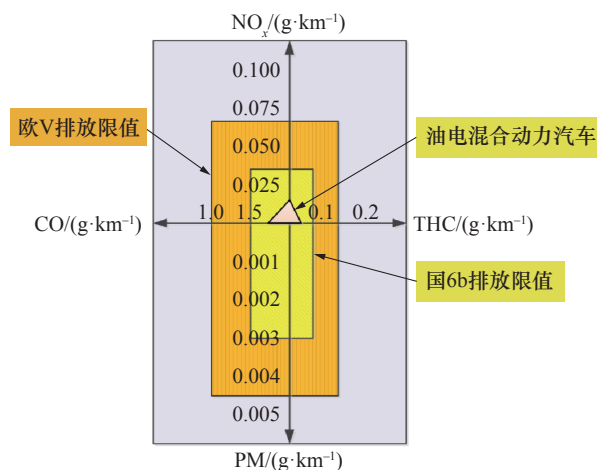


图 3 HEV 汽车污染物排放示意图

中国发展电动车, 锂、钴等电池材料很高的对外依存度将形成新的资源安全风险, 目前我国制造电池用的锂和钴的对外依存度分别超过 70% 和 80%。近三年, 世界锂、钴价格随着电动车发展呈暴涨趋势, 继续快速增长的电动车产量将会进一步推高锂、钴的价格, 可能将电动车成本推高到难以承受的地步。我国电动车保有量的增长还将带来废旧电池量的增长, 据测算到 2020 年我国报废的电池将达到 1.7×10^5 t 左右, 但是到目前为止电池回收利用尚无成熟可靠、对环境污染小的技术 [9,10]。电动车采用快充技术, 虽然可以减少充电的烦恼, 但对变配电系统和电网的平稳运行冲击大。我国人口居住集中, 城市及一批新型城镇居民住宅大多是多层建筑, 导致充电桩建设难度很大, 这是制约我国电动车推广不可忽视的因素。

燃料电池车的发展主要受到制造成本、电池耐

久性和可靠性等因素制约。中国燃料电池发展滞后于世界先进水平 [3]，如催化剂、质子交换膜、碳布/纸、膜电极、密封剂、双极板等燃料电池关键材料主要依靠进口，尚不具备完整的燃料电池电堆产业链；电池主要性能低于国际先进水平，其中寿命低约 40%，催化剂铂载量高约 5 倍，造成电堆功率密度低，生产成本低；70 MPa 储氢瓶及配套的设 备、阀门产业化缺少技术支持。

电动车、氢燃料电池车等新能源汽车在短期内不可能全面替代内燃机汽车。

（二）汽车动力多元化是主趋势，内燃机动力仍会占有主体地位

面对汽车动力革命，国际知名汽车生产企业、石油开采和油品生产企业、能源或金融研究机构都在持续研究汽车动力革命的进程，思考应对这场汽车动力革命。图 5 给出了不同研究机构对电动车在

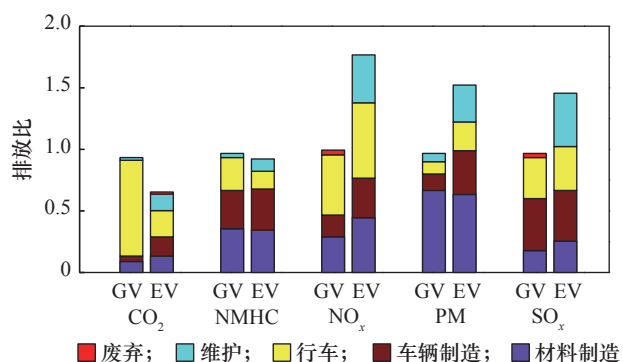


图 4 电动车与汽油车全生命周期污染物排放对比

2020—2040 年发展趋势的预测，但是研究的结论存在较大差别。

混合动力、插电式混合动力、燃料电池和纯电动车技术各有优势，如图 6 所示，将根据技术特点发挥各自的优势并占据相应市场。未来，混合动力、纯电动和燃料电池车的产销量及市场保有量会逐步增长，但是内燃机动力仍会占据主导地位。

（三）我国车用燃料消费趋势与消费结构预测

2018 年我国千人汽车保有量为 173 辆，远低于发达国家千人汽车保有量 500~800 辆的水平。随着经济发展，汽车保有量将持续增长，从国情出发我国大力发展城际高速铁路和城镇公共交通，千人汽车保有量不会达到发达国家水平。预计 2020 年、2030 年将分别达到 2.6 亿~2.8 亿辆和 3.8 亿~4.0 亿辆，2040 年前后将达到 4.8 亿~5.0 亿辆的峰值，全国千人汽车保有量的平均峰值在 350 辆左右。2018 年，中国汽车保有量为 2.4 亿辆，新能源汽车保有量占汽车总保有量的 1.09%，今后，电动车、燃料电池车等新能源汽车的保有量会逐步增长。内燃机技术的进步、油电混合动力汽车和新能源汽车的发展会影响车用燃料的消费，预计到 2030 年，新能源汽车不会明显影响液体燃料的消费；到 2040 年，90% 的汽车动力仍将依靠液体燃料；到 2050 年，汽车动力对液体燃料的依赖程度还会在 60% 以上。

图 7 给出了 2005—2017 年我国车用燃料消费结构变化情况，柴油消费从 2005 年到 2015 年快速增长，2015 年达到峰值 1.73×10^8 t/a，2016 年至今进入峰值平台期。汽油消费还在稳定增长中，预计

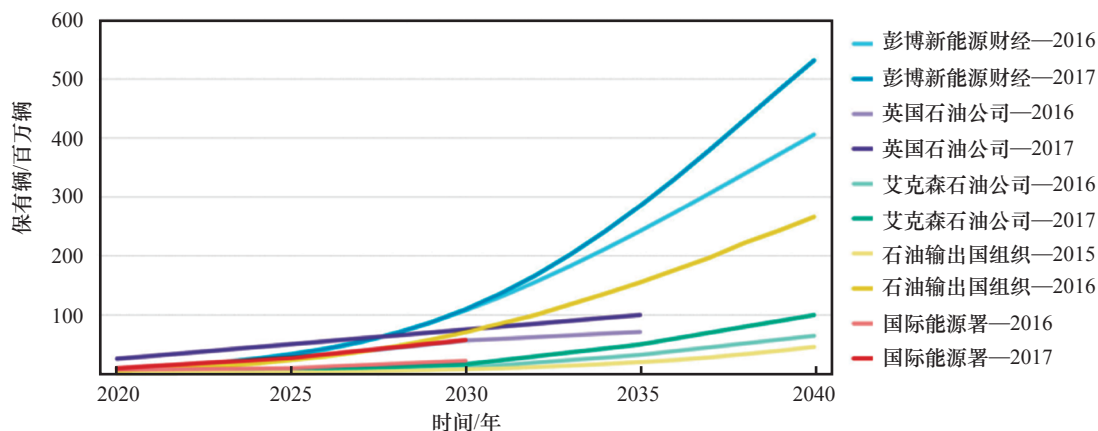
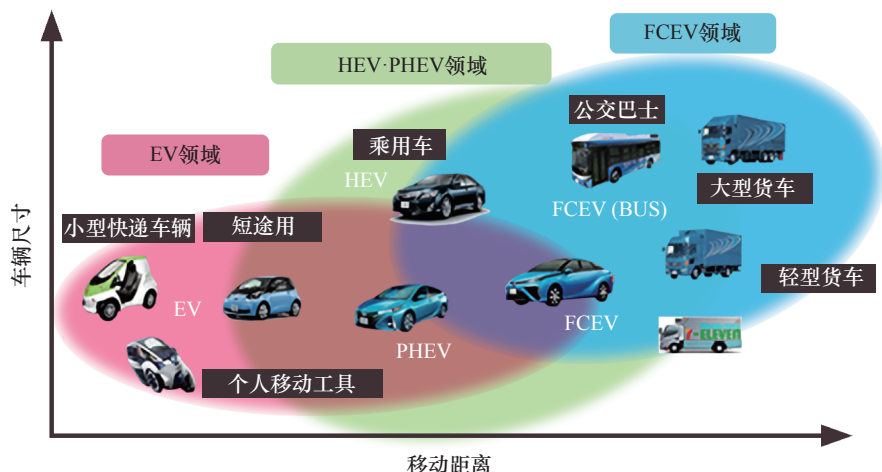


图 5 不同研究单位对电动车发展趋势的预测

图片来源：彭博新能源财经



HEV—混合动力；PHEV—插电式混合动力车；EV—纯电动车；FCEV—燃料电池车

图6 各类汽车动力评价图

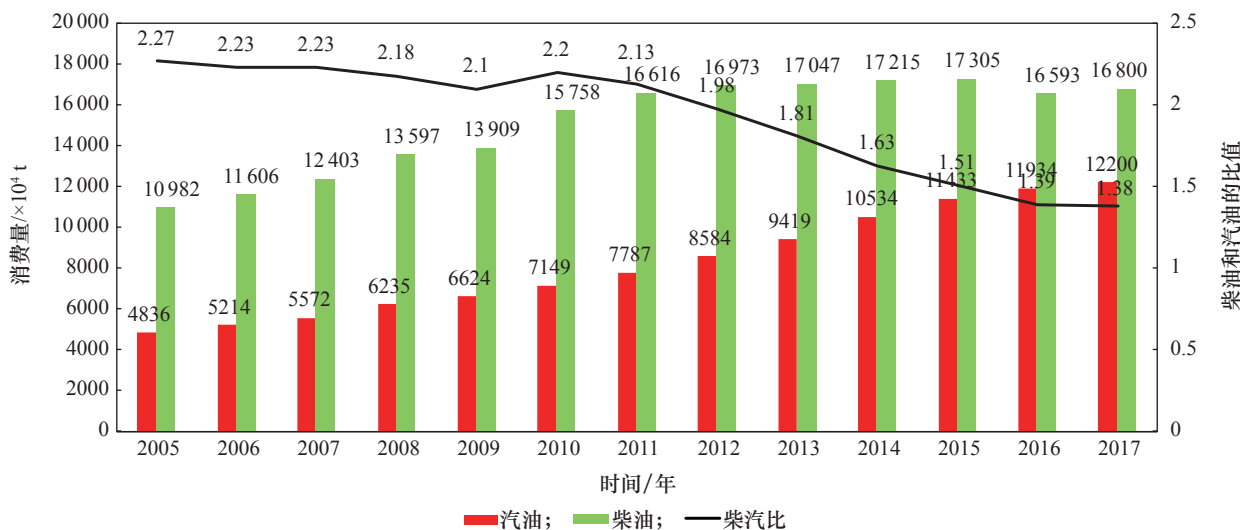


图7 2005—2017年我国车用燃料消费结构变化

汽油消费量在2025年前后会达到 1.70×10^8 t左右的峰值。

四、推进炼油、汽车行业协同发展建议

（一）开展分子水平的内燃机中燃料燃烧机理研究

内燃机是燃料与空气发生化学反应将化学能经由热能转化为机械能的复杂反应器，燃料在反应器中的质量和能量传递需要在瞬间高速、高效完成，实现燃料充分燃烧，将化学能高效转化为机械能，降低生成CO、THC、PM及积碳等副反应。研究内燃机中燃料的燃烧机理是优化燃料组成及创新内

燃机结构、控制反应路径、防止爆震早燃等非正常燃烧、提高内燃机热效率、实现低碳低污染排放、开发新一代内燃机的基础性工作。

汽油、柴油的组成非常复杂，汽油主要由5~11个碳原子的烃分子组成，有正构烃、异构烃、环烷烃、短侧链单环芳烃等360多种烃分子。柴油主要由12~20个碳原子的烃分子组成，有正构烃、异构烃、长侧链环烷烃、长侧链单环芳烃、双环芳烃、三环芳烃，烃分子更多。燃油进入发动机气缸后，要在极短的时间内完全气化并和空气均匀混合，不同烃分子的沸点、闪点、气化热、燃烧热各不相同，会存在气化速度与氧混合速度的差异，不同烃分子和

氧发生燃烧反应的历程也不同。

以汽油和柴油组成分子水平解析和表征研究的成果为基础，从分子水平开展汽柴油在内燃机中的燃烧机理研究，从分子水平认识燃烧过程，既可以从理论上指导清洁高效内燃机的开发，也可以获得确保内燃机清洁高效的燃料烃分子结构和组成信息，从理论上指导燃油组成和馏程的优化，靶向推进分子炼油理论和技术的进步。

（二）研究车用燃料组成与颗粒物排放关联模型

颗粒物排放限值是汽车排放标准升级的核心指标，第六阶段排放限值要求颗粒物粒子数量（PN）为 $6 \times 10^{11} \#/\text{km}$ ，燃料组成是影响颗粒物质量（PM）排放的重要因素。本田汽车公司的PM指数，从模型角度预测燃油组成对颗粒排放趋势的影响，模型的正确性和科学性已被多个车油研究项目和小型专项试验验证。为了指导油品组成优化，开发了简化PM指数模型，将PM指数和馏程参数关联并实现指标标准化，丰田汽车等车企基于大量研究提出汽油标准应引入T70限值，而欧洲车企提出引入T90限值。

重芳烃含量对颗粒物排放影响显著，通过馏程指标限值控制PM指数的本质是控制汽油中的重芳烃含量。我国油品生产企业要和汽车企业合作，借鉴国外的研究成果，开展燃料组成与PM的关系研究和简化模型开发，为制定我国国7车用油品标准奠定基础。

（三）开发高品质燃料

面向未来的车用燃油既要求清洁化，支持内燃机实现近零排放（不对大气环境有负面影响），还要支持内燃机提高效率，降低油耗，减少碳排放。根据目前的认识，要求车用汽油不含碳九以上芳烃，提高RON值；考虑车辆启动性、驱动性、蒸发排放等需求，要求车用汽油饱和蒸汽压执行地区/季节分区控制；要求车用柴油多环芳烃含量更低。

未来，炼油行业要注重优化总加工流程提升油品质量，同时开发、生产高品质车用燃料。一是要致力于提高汽油RON值，尽快取消89号、92号，逐步减少95号，增供98号以上的汽油；二是要优化汽油馏程，将T50从110℃降低到105℃以下，增设T70或T90限值指标；三是要将柴油中的多

环芳烃从7v%降低到更低水平。国外一个知名车企提出支持汽油提高效率的关键是要提高汽油的RON，不必设定MON的强制指标；汽油中的烯烃有利于提高RON，限值指标可以适当放宽，不必追求过低限值。他们的新研究突破了传统认识，一时可能很难被国内接受。我国要按清洁高效的要求，深入开展汽油RON、烯烃、芳烃含量对尾气排放和内燃机效率的影响研究，为科学制定新的汽油标准奠定基础。

（四）开发新规格燃料

以有效热效率60%为目标，内燃机领域正在积极开发汽油压缩燃烧（GCI）、双燃料反应活性控制着火燃烧（RCCI）、汽油/柴油双燃料高效预混合低温燃烧（HPCC）、均质充量压燃（HCCI）着火燃烧、适度和较高分层的压燃燃烧（GDCI）等先进燃烧技术[4]，先进燃烧技术应配套以新规格燃料。如Gautown Kalghatgi等开展汽油压缩燃烧研究，提出了新规格燃料指标[11,12]，见表5。为了压缩燃烧内燃机的量产和推广，需要炼油行业和汽车行业紧密配合，共同深入研究压缩燃烧内燃机需要的油品的组成、馏程及其他质量指标对效率和排放的影响，建立新的燃料标准。从已有的研究结果看，随着汽油压缩燃烧内燃机的量产与推广，低辛烷值油品的消费增加，可支持炼油厂为现有汽油机提供更多RON值在98以上的汽油。

面向新型内燃机的开发，炼油行业要和汽车行业共同组成内燃机燃烧新技术协同创新团队，主动承接新规格燃料的研制开发任务，及时将研制开发的新燃料标准化。炼油行业要同步开展生产新规格燃料的石油炼制工艺开发和总流程优化研究，为生产适应新技术要求的燃料做好准备。

（五）开发高档润滑油

降低发动机油耗，除提高燃烧效率外，还需要降低摩擦损失。炼油行业要配合高效内燃机运动部件的结构设计改进材料表面的改性，做好配套的润滑油基础油和添加剂的技术开发。车用高档润滑油消费增长已成为我国高档润滑油消费增长的主要推动力，随着高效低排放内燃机汽车的增加，炼油企业要加快润滑油品种结构调整，增产高档内燃机润滑油。

表 5 GCI 使用的新燃料主要性能指标

| 主要指标 | 数值 | 主要指标 | 数值 | 主要指标 | 数值 |
|-----------------------------------------------------------------|----------|--------------------------|------|------------------------------------------|------|
| RON | 70~85 | 初馏点 / $^{\circ}\text{C}$ | 28 | 芳烃含量 /v% | < 35 |
| 十六烷值 | < 27 | 终馏点 / $^{\circ}\text{C}$ | 250 | 硫含量 / ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) | < 10 |
| 密度 (15 $^{\circ}\text{C}$) / ($\text{kg}\cdot\text{L}^{-1}$) | 0.72~0.8 | 烯烃含量 /v% | < 18 | 苯含量 /v% | < 1 |

五、结语

电动车、氢燃料电池车等新能源车的发展开启了汽车动力革命的大幕，汽车动力开始进入多元化的时代。受技术、资源和市场等多种因素制约，电动车、燃料电池车的发展是一个渐进的长期的过程。内燃机的热效率还有很大的提升空间，采用高效内燃机的油电混合动力汽车可大幅度降低污染物和碳排放，是符合我国国情的重要汽车动力。在今后几十年内，内燃机动力仍会占据汽车动力主体地位，到 2050 年汽车动力对液体燃料的依赖程度仍会在 60% 以上。我国柴油消费已进入峰值平台期，预计汽油消费在 2025 年达到峰值。为适应内燃机汽车清洁高效的要求，要积极推进炼油行业与汽车行业的协同发展，开发并生产高品质车用燃料和润滑油，要配合新型内燃机研究开发与量产，开发和生产新规格燃料。

参考文献

- [1] International Energy Agency. Global EV outlook 2018 [R]. Paris: International Energy Agency, 2018.
- [2] Information Trends LLC. Hydrogen fuel cell vehicles—A global analysis [R]. Washington D.C.: Information Trends LLC, 2018.
- [3] 《中国公路学报》编辑部. 中国汽车工程学术研究综述: 2017 [J]. 中国公路学报, 2017, 30(6): 1–197.
Editorial Department of China Journal of Highway and Transport. Review on China's automotive engineering research progress:

- 2017 [J]. China Journal of Highway and Transport, 2017, 30(6): 1–197.
- [4] 苏万华, 张众杰, 刘瑞林, 等. 车用内燃机技术发展趋势 [J]. 中国工程科学, 2018, 20(1): 97–103.
Su W H, Zhang Z J, Liu R L, et al. Development trend for technology of vehicle internal combustion engine [J]. Strategic Study of CAE, 2018, 20(1): 97–103.
- [5] 赵福全. 应用性评估内燃机的挑战、潜力与机遇 [N]. 中国汽车报, 2019-03-07(004).
Zhao F Q. Rational assessment of the challenges, potentials and opportunities of internal combustion engines [N]. China Automotive News, 2019-03-07(004).
- [6] Krishna V S, Hari O B, Dheerendra S. A comprehensive review on hybrid electric vehicles: Architectures and components [J]. Journal of Modern Transportation, 2019, doi.org/10.1007/s40534-019-0184-3.
- [7] 胡信国. 电动汽车用先进电池技术 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2018.
Hu X G. Advances in battery technologies for electric vehicles [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2018.
- [8] Timmers V R J H, Achten P A J. Non-exhaust PM emissions from electric vehicles [J]. Atmospheric Environment, 2016, 134: 10–17.
- [9] 张笑笑, 王鸯鸯, 刘媛, 等. 废旧锂离子电池回收处理技术与资源化再生技术进展 [J]. 化工进展, 2016, 35(12): 4026–4032.
Zhang X X, Wang Y Y, Liu Y, et al. Recent progress in disposal and recycling of spent lithium-ion batteries [J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2016, 35(12): 4026–4032.
- [10] Zheng X H, Zhu Z W, Lin X, et al. A mini-review on metal recycling from spent lithium ion batteries [J]. Engineering, 2018 (4): 361–370.
- [11] Kalghatgi G T. The outlook for transport fuels: Part 1 [J]. Petroleum Technology Quarterly, 2016 (Q1): 23–31.
- [12] Kalghatgi G T, Gosling C, Wier M J. The outlook for transport fuels: Part 2 [J]. Petroleum Technology Quarterly, 2016 (Q2): 17–23.